

移動マニピュレータによる物体ひろいあげに関する研究(第一報)

～ 実環境中の把持対象物体の認識 ～

山崎 公俊(筑波大) 友納 正裕(筑波大) 坪内 孝司(筑波大) 油田 信一(筑波大)

Object picking by a mobile manipulator – Recognition of a target object in a realistic environment –

Kimitoshi Yamazaki, Masahiro Tomono, Takashi Tsubouchi and Shin'ichi Yuta
(University of Tsukuba)

Abstract—In realistic world, there are many objects and robot moving in such environment can manipulate many object around it. We intend to achieve the work for a mobile manipulator from finding target object to picking it up. In this issue, it is assumed that the robot only know its target object. We propose how to detect target object in realistic environment. That is, 1. Using monocular vision sensor equipped on the robot, robot get image from many different viewpoints along with motion of the robot. And 2. from these image data, the robot finding the target object. We report result of experiment by a mobile robot and its evaluation.

Key Words: Mobile manipulator, Monocular motion stereo, Object Recognition

1. はじめに

周囲をとりまく環境をセンスし、そのセンスした情報によって次にとるべき行動を決定し実行することが、ロボットには求められる。移動ロボットにおいては、その周囲外界をセンスするものとして、超音波距離センサ、光アクティブ距離センサ、TVカメラによる視覚等が用いられる。

計算機の小型高速化とTVカメラの小型化により、視覚とその処理機構を全てのロボット上に搭載し、ロボットの行動決定のためのセンサとすることは近年非常に盛んである。移動ロボットにおいては、その進路上での障害物の有無、あるいは自己位置の同定や確認、修正に視覚が使われ、その環境内での走行、すなわちなビゲーションがおこなわれる [1][2][5][6][11]-[13]。このナビゲーションでは、走行環境に関する知識(環境モデルあるいは地図)を事前に与えることにより、視覚認識系の処理の負担を軽減しながら環境中の対象物の認識を容易にし、ナビゲーション行動自体ができるだけロボットにおこなえるような努力が払われることが多かった。

移動ロボットにマニピュレータを装備した移動マニピュレータは、ロボット自身の移動能力に加え、外界に置かれた物体への積極的な作用が可能な点が研究対象として興味深い。著者らの研究室でも、ドアを開けて通り抜けをおこなったり [10]、床上に置かれた缶をひろいあげるなどの動作をおこなう [3] 移動マニピュレータが実現されてきた。これらは、ドアそのものやドアのノブの位置、缶の位置などはその移動マニピュレータに地図として与えていた。これに対し著者らは、そのような地図あるいはロボットに装備したマニピュレ

ータの把持対象物に関するモデルをあらかじめ与えることなしに、ロボットに搭載した視覚により把持しうる対象物を発見し、その対象物に接近し、それを把持する一連の動作が実現できる移動マニピュレータを開発したい。この目的のため、ひろいあげ対象物の認識は視覚による事とし、そのためのコンピュータビジョンシステムも構築したい。本稿では、移動マニピュレータのためのコンピュータビジョンで必要となる機能のひとつであるひろいあげ対象物の発見方法について述べる。

2. 問題の設定

本研究の最終的な目標は、「移動マニピュレータに搭載した視覚により、マニピュレータの手先ハンドで把持できる対象物を発見し、これを把持してひろいあげること」である。これまでによくとられるアプローチでは、把持対象物体に関するモデルをあらかじめ与えることにより、対象物の認識をおこなうものが多かった。しかし、本研究では、究極的には日常の生活環境において存在する物体について把持可能なものを全て対象としたい。この場合、存在する物体のそれぞれについてモデルを持たせることは困難である。すなわち、対象物体の種類についてモデルをひとつひとつ与えるには作業量が非常に多くなる。また、仮にその対象物体に対し正確な3次元データを与えるとすると、その認識対象は1つのモデルにつき1種類必要であり、対象の形状に変化があれば認識が不可能になってしまう恐れもある。本研究では、もっと柔軟性のある認識を目指したい。したがって、あらかじめ知識として、把持しようとする物体の具体的な形状に関するモデルを移

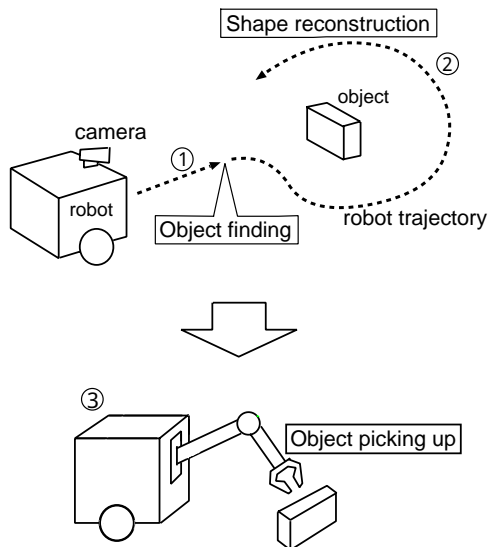


Fig.1 処理の流れ

動マニピュレータに持たせるのではなく、本研究では、

1. 視覚によって物体を移動しながら発見する。
(対象物の発見)
2. 発見した物体の形状を認識する。
(対象物の形状復元)
3. 認識した物体が把持可能な形状であれば、把持可能な姿勢に移動して把持をおこなう。
(対象物のひろいあげ動作)

というアプローチをとることにする (Fig.1)。上記の項目 1 . の「対象物の発見」においては、まず、移動マニピュレータは床面上にある物体の有無を探索しながら走行する。このフェーズでは、実環境中の対象物の正確な位置とおおまかな形状を求める機能を視覚に要求する。項目 2 . の「対象物の形状復元」においては、発見された対象物の正確な形状を求める。このとき移動マニピュレータがおこなうべきことは、正確な形状復元のための情報を収集することと、そのよう情報を得やすいようなロボット自身の移動経路を決定することである。最後の項目 3 . 「対象物のひろいあげ動作」では、一つ前のフェーズでの対象物の形状の認識に基づき、その姿勢・形状からひろいあげのための計画を立ててひろいあげ動作を実行する。

本稿は、このようなアプローチをとって移動マニピュレータによる対象物のひろいあげをおこなう研究のうち、上記の項目 1 . の「対象物の発見」に関する報告である。なお、本研究では、把持をおこなう対象物に対して、次の仮定を置く。

- 対象物はロボットが移動する床面上に置かれている。
- 対象物はテクスチャを有する。
- 対象物の形状は曲面を含んでも良いものとする。

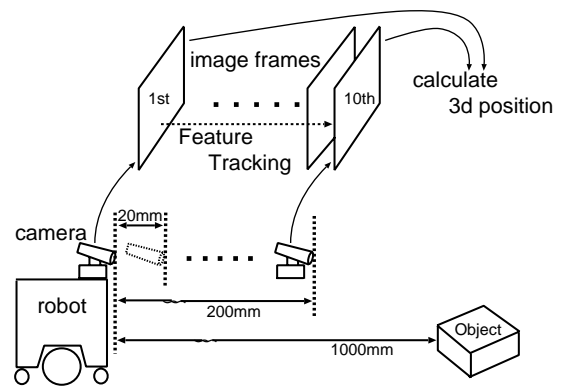


Fig.2 連続画像の取得

3. 対象物の発見

対象物の発見処理の目的は、実環境から、床面上に置いてある対象物を特定し、その正確な位置とおおまかな形状を得ることである。本章では、移動ロボットが走行しながら、床面上の把持対象物を発見するため、移動ロボットに搭載するコンピュータビジョンシステムのひとつの構成法を述べる。

3.1 課題とアプローチ

本研究では、移動ロボットは、対象物の形状と位置が未知の状態から対象物を発見する。そのため、対象物が存在しそうな範囲をある程度探索しなければならないので、処理が高速である必要がある。また、実環境から得られる情報には誤差や外れ値が含まれ、走行中のロボットの位置・姿勢自体にも誤差が蓄積されるので、処理結果の精度を向上するための対策も必要である。

これらを考慮し、本研究では次のようなアプローチをとる。まず、実環境の情報を、画像から抽出した特徴点として取得する。これらの特徴点から形状と位置の情報を得る手法には種々のものがあるが、対象物を発見する初期段階では高速性を優先し、モーションステレオ法により形状と位置をおおまかに復元する。しかし、モーションステレオで得た復元情報は、ロボットの姿勢誤差により影響を受けるため、非線形最小化による形状復元手法を用いて、その誤差を補正して精度を向上させる。これにより、発見を高速におこないつつ、高い精度を得ることを図る。また、外れ値などに対処するために、特徴点のフィルタリングもおこなう。対処物発見の基本的な流れを次節以降で、実環境における対策については 4 章で述べる。

3.2 対象物発見の手順

ロボットの移動開始位置において、その位置でカメラから画像を 1 枚取得する。その後、少しずつ移動し画像を取得する (Fig.2)。この動作を繰り返すことで得られた床面上の連続画像を用いて、以下の手順で対象物を発見する。

1. 取得した連続画像から、テクスチャのある部分を

特徴点として抽出・追尾する。

(特徴点の抽出と追尾)

2. 特徴点の推移と、移動ロボットに搭載したカメラの位置・姿勢から、特徴点の3次元位置を復元する。(特徴点の3次元位置復元)
3. 復元した特徴点をグループに分け、床面上にあるグループを一つ選択し、対象物を表す特徴点集団として特定する。(対象物の特定)

また、3次元位置復元や対象物の特定に悪影響を与える特徴点については除去処理を加える。

3.3 特徴点の抽出と追尾

取得した画像列からは、ある画像中のある特徴が、次の画像中においてどこに移動したかが判らなければならない。本研究では、Tomasiらによって提案された手法を特に用いた KLT-Tracker(Kanade-Locas-Tomasi-Tracker) を利用した [7]。この Tracker により、連続画像を1枚取得する度に画像中の特徴点を抽出し、次の画像を取得したとき、この特徴点を追尾することで、特徴点の画像間の推移を記録する。

3.4 特徴点の3次元位置の復元

特徴点の3次元位置復元は、一般にモーションステレオと呼ばれる手法を利用する。すなわち、2枚の画像を取得したカメラの相対位置・姿勢 (\mathbf{T} , \mathbf{R}) および2枚の画像上で対応の取れている特徴点の画像上の位置 (\mathbf{x}_1 , \mathbf{x}_2) が分かっているとき、これらからその特徴点の3次元空間中の位置 (\mathbf{X}) を求める。本研究では、 \mathbf{X} が2枚の画像上に投影された点を $\mathbf{x}_1 = (u_1, v_1)$ 、 $\mathbf{x}_2 = (u_2, v_2)$ と表したとき、モーションステレオによる形状復元には、以下の評価関数を用いた [4][8][9]。

$$C = \|\mathbf{X} - s_1 \mathbf{m}_1\|^2 + \|\mathbf{X} - s_1 \mathbf{R} \mathbf{m}_2 + \mathbf{T}\|^2 \quad (1)$$

ここで、 \mathbf{R} 、 \mathbf{T} 、 \mathbf{m}_1 、 \mathbf{m}_2 はそれぞれ、

$$\begin{aligned} \mathbf{R} &= \mathbf{R}_1 \mathbf{R}_2^{-1} \\ \mathbf{T} &= \mathbf{R}_1 (\mathbf{t}_2 - \mathbf{t}_1) \\ \mathbf{m}_1 &= \begin{bmatrix} u_1/f_1 \\ v_1/f_2 \\ 1 \end{bmatrix}, \mathbf{m}_2 = \begin{bmatrix} u_2/f_1 \\ v_2/f_2 \\ 1 \end{bmatrix} \end{aligned}$$

である。 \mathbf{R} はカメラの姿勢を表す行列であり、特に \mathbf{R}_1 、 \mathbf{R}_2 はそれぞれ、ワールド座標系からの最初のカメラの姿勢、現在のカメラの姿勢を表す。 \mathbf{T} はカメラの位置を表す平行移動ベクトルであり、特に \mathbf{t}_1 、 \mathbf{t}_2 はそれぞれ、ワールド座標系からの最初のカメラ位置、現在のカメラ位置を表す。 s_1 、 s_2 は、それぞれ \mathbf{m}_1 、 \mathbf{m}_2 の長さを表す。また、 f_1 、 f_2 は、カメラの内部パラメータの焦点距離に関する定数で、既知とする。

\mathbf{R} 及び \mathbf{T} は、移動ロボットの車輪の回転数の累積により得られる自己位置の推定値 (オドメトリ) に基づき、最初と現在に画像を取得した位置から得ることができる。この (1) 式の評価値 C を最小とする \mathbf{X} をその

特徴点の3次元位置とする。これにより特徴点の3次元位置が求まる。実際の環境で移動ロボットを動作させる時、ここで求まるカメラの位置・姿勢と特徴点の復元結果を、非線形最小化によって補正するが、その詳細については4章で述べる。

3.5 対象物の特定

次に必要な処理は、復元された特徴点の3次元位置から、ひろいあげの対象とする物体を表す特徴点集団を特定することである。方法は以下の通りである。

1. 床と平行な面を一定のサイズ毎に格子に分けた平面を考え、全ての特徴点をその平面上に射影する。
2. 現在調べている格子や周辺の格子に特徴点が存在するか否かによって、クラスタリング処理をおこない、特徴点をグループ毎に分割する。
3. グループに分けられた特徴点集団から、移動ロボットに近い位置にあるものを選択し、対象物を表す特徴点集団として特定する。

4. 実環境での問題と対処

実環境中で、移動ロボットに対象物発見処理をおこなわせる際、考慮すべき問題とその対処法について述べる。

4.1 不要な特徴点の除去

3.3~3.5で述べた処理をおこなう際、実環境から得られる特徴点の追尾結果には誤差や外れ値が含まれており、また、対象物発見に不必要なものも存在する。処理結果に悪影響を与えるこれらの特徴点については、いくつかの条件を設定し、これを除去する処理を随時おこなう。

4.1.1 復元誤差が大きな点の除去

モーションステレオの際、式 (1) の最小化処理において、もし2枚の画像中で対応する特徴点がほとんど動かないと、得られた特徴点の位置 \mathbf{X} に十分な精度が得られない。そればかりか、3次元位置を復元した結果、良い精度で位置が求まっている点と、そうでない点と同じ場所に混在してしまい、後の特徴点集団特定の処理に影響する。このような事態を避けるため、2枚の画像中で対応する特徴点で、カメラの移動方向に対して移動が少ない特徴点については、復元前に取り除く。

4.1.2 追尾ミス特徴点の除去

本研究では、画像間で特徴点を追尾する処理をおこなっているが、Trackerが特徴点を誤って追跡してしまった場合、その復元結果は実際と異なってしまう。しかし、そういった特徴点は、式 (1) において評価値が大きくなるので、この振る舞いを利用して取り除く。

4.1.3 床の情報をういた対象物の分離

対象物発見の際、復元された特徴点に床面上のものが混ざっていた場合、対象物の特徴点集団を特定する際に妨げとなる。そこで、床面の色情報を利用し、床面上の特徴点は、あらかじめ除去する処理を加えた。入

力画像である RGB カラー画像を、 L^*a^*b 表色系に変換し、その表色系からあらかじめ作成した床と同色の正規分布と比較することで、画像中の床面上の点を除去する。

4.2 移動ロボットの測位誤差への対処

移動ロボットのオドメトリから得られるカメラの位置・姿勢の情報は、いくつかの要因により誤差が含まれ、正確であるとは限らない。ここでは、提案する対象物の発見処理を移動ロボットに搭載した際に、考慮すべき問題について評価し、その対処法について説明する。

4.2.1 カメラ姿勢の復元結果への影響

モーションステレオで用いる式 (1) は、カメラ姿勢を表す \mathbf{R} と、カメラ位置を表す \mathbf{T} が正確であるという前提の元に成り立つものであるが、もしこれらに誤差を含むと、復元結果が実際とは異なってしまふ。いくつかの条件で実験した結果、モーションステレオによる 3 次元位置復元は、カメラ位置・姿勢に誤差があった場合、特に回転方向に関しては、復元結果全体が大きく歪んでしまうことが判った。一方で、移動ロボットのオドメトリから得られるカメラ位置・姿勢には、そもそも累積誤差が含まれる。また、画像を取得したときに時刻と、オドメトリの値を実際に取得したときの時刻は、必ずしも正確な同期が取れているとは限らない。このため、オドメトリから求めたカメラ位置・姿勢を用いて形状復元をおこなう場合、カメラ位置・姿勢の誤差を補正する必要がある。

4.2.2 カメラの位置・姿勢の再算出

本研究の実験システムは、カメラに一定の俯角をつけ、それを搭載したロボットが床面上を走行するものである。ここで、可変なパラメータは、カメラの俯角 θ 、カメラのパン角 ϕ 、ロボットの直進成分 t_x 、並進成分 t_y の合計 4 つとなる。よって、最適なカメラの位置・姿勢を求めるためには、上記の 4 つのパラメータの組み合わせを見つけることで達成できる。しかし、前述した線形の評価関数は、並進成分とスケールを分離できないため、並進成分を小さくすると評価関数の値も小さくなってしまい、最適なパラメータを求められない。そこで、以下のような非線形の評価関数を改めて定義した。

$$C = \sum_{j=0}^2 \sum_{i=0}^P \left(\frac{\mathbf{r}_{xj}^T \mathbf{m}_{ij}}{\mathbf{r}_{zj}^T \mathbf{m}_{ij}} - \frac{X_i + t_{xj}}{Z_i + t_{zj}} \right)^2 + \sum_{j=0}^2 \sum_{i=0}^P \left(\frac{\mathbf{r}_{yj}^T \mathbf{m}_{ij}}{\mathbf{r}_{zj}^T \mathbf{m}_{ij}} - \frac{Y_i + t_{yj}}{Z_i + t_{zj}} \right)^2 \quad (2)$$

ここで、 $\mathbf{m}_i = (u_1/f_1, v_1/f_2, 1)$ であり、 \mathbf{r}_x 、 \mathbf{r}_y 、 \mathbf{r}_z は、回転行列 \mathbf{R} の各軸成分を表す行ベクトルである。 t_x 、 t_y 、 t_z は、ワールド座標系からカメラ位置への平行移動成分、 X 、 Y 、 Z はワールド座標系から見た特徴点の 3 次元座標を表す。また、 i は画像、 j は特徴点の番号を表す。この式 (2) の非線形の評価関数から、 \mathbf{R} と \mathbf{T} 、特徴

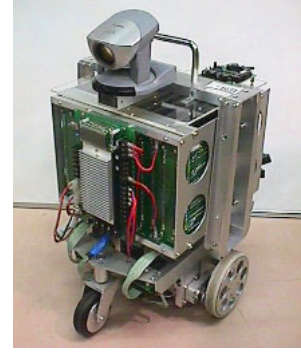


Fig.3 移動ロボット

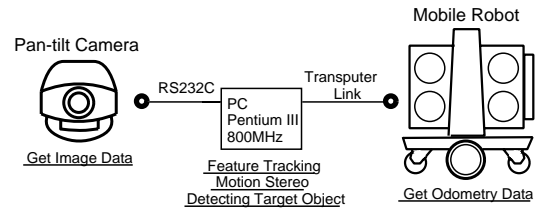


Fig.4 システム構成

点の 3 次元位置の補正をおこなう。計算手順としては、非線形最小化の初期値はなるべく真値に近いものが望まれるため、まず式 (1) の線形最小化をおこない暫定的な特徴点の 3 次元位置を求める。さらに、本研究の実験システムでは、カメラの角度成分が平行移動成分に比べ復元結果に与える影響が大きいため、式 (1) の結果の角度成分を補正する。その結果を初期値として非線形最小化処理へ移行する手法をとる。この 2 段階の 3 次元位置算出により、真値により近い初期値が得られるので、局所解に落ちにくく、収束の速い最小化処理が可能となる。この時、カメラの床面からの高さ t_z はロボットが移動しても変化せず、また、オドメトリから求められるロボットの自己位置には誤差が含まれるが、移動距離は比較的信頼できると考えられる。そこで、具体的には、 θ 、 ϕ 、 t_y と、特徴点の 3 次元座標 (X, Y, Z) を変数とした評価関数 C の最小化処理をおこなう。

非線形最小化にはマーカート法 [14] を利用しており、更新式は以下ようになる。

$$\mathbf{n}_{i+1} = \mathbf{n}_i - (\lambda \mathbf{I} + \mathbf{H}^{-1}) \frac{dC(\mathbf{n}_i)}{d\mathbf{n}}$$

ここで、 \mathbf{n} は変数を並べたベクトルであり、 λ は正のスカラー定数、 \mathbf{H} はヘッセ行列である。この処理の追加により、オドメトリから得られたカメラの位置・姿勢を補正する。

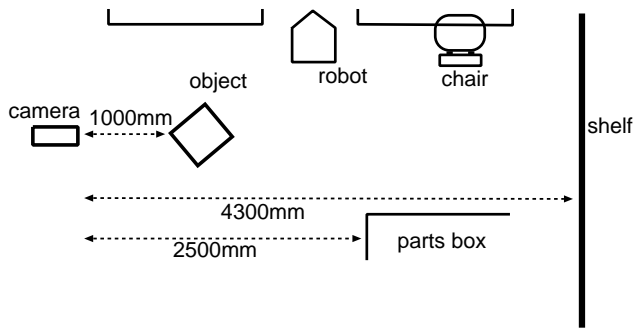


Fig.5 実験環境



Fig.6 原画像

5. 実験

以上の対象物発見処理を実環境中でおこなった。その際の環境は Fig.5 のようになっており、中央に直方体の箱、左端にロボット、右端に棚が配置されている。

5.1 実験システム

移動ロボットが実際に移動しながら床面の対象物を発見することをおこなうため、移動ロボットに TV カメラのみを搭載した移動ロボット (Fig.3) を使用する。このロボットは、筆者の所属する研究室において開発されたものである。そしてカメラを移動ロボットの前面に設置し、床面を見渡せるようにカメラに下向きの俯角をつける。この実験システムでは、TV カメラから得た画像を地上の計算機に送り、全ての画像処理および対象物の発見に関する処理は地上の計算機でおこなっている。実験のシステム構成を Fig.4 に示す。カメラは Canon 製の VC-C4 パンチルトカメラ (41 万画素)、PC の CPU は Pentium800MHz である。また、データの受け渡しは、ロボットから得られたデータが高速シリアル通信を介して PC へ入力され、それにより画像取得の命令が PC から RS232C を介してパンチルトカメラへ出力されることでおこなわれる。最終的にはこの計算機もロボット上に置く予定である。実際にロボット上から取得した画像の例を Fig.6 に示す。

5.2 実験結果

カメラの俯角を 20 度にし、画像取得をロボットが 20mm 進む毎におこなう状況の元で、実験をおこなった。

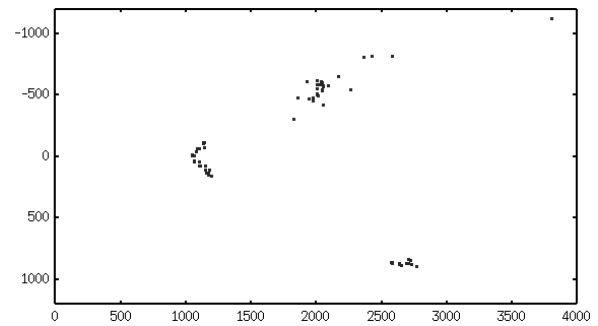


Fig.7 ロボットの位置・姿勢が正確な場合の特徴点の復元結果

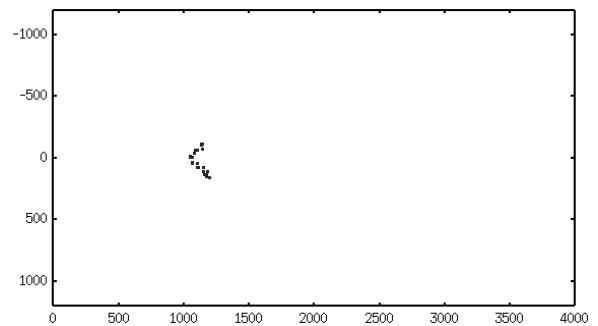


Fig.8 特定された特徴点集団

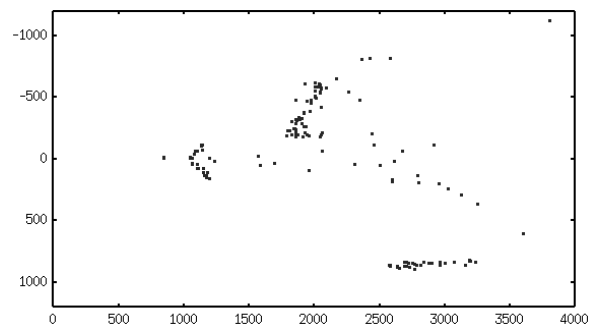


Fig.9 特徴点の復元結果 (不要点除去なし)

取得した全ての画像から特徴点を追尾し、モーションステレオによる 3 次元位置復元は、ロボットが 200mm 進んだ際、最初と現在の 2 枚の画像間においておこなった。

処理時間については、 480×320 pixel の画像取得 (モノクロ、カラー) に 0.15sec、床面領域の色情報の分離に 0.2sec、特徴点追尾に 0.5sec を要した。この取得画像に対する処理を、移動ロボットを直線走行させつつ繰り返す。

まず、対象物発見の方法を検証するため、ロボットの自己位置を人間の手によって測定した、カメラの位置・姿勢に誤差が無い場合の実験結果を示す。Fig.7 は、Fig.5 に示す環境中での特徴点の上部から見た復元結果を図示したもので、見やすさのため高さについては省略している。ここでの x 軸は、カメラ位置を原点とした奥

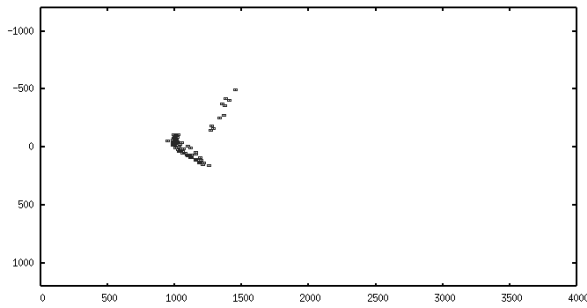


Fig.10 オドメトリによる位置情報からの復元結果

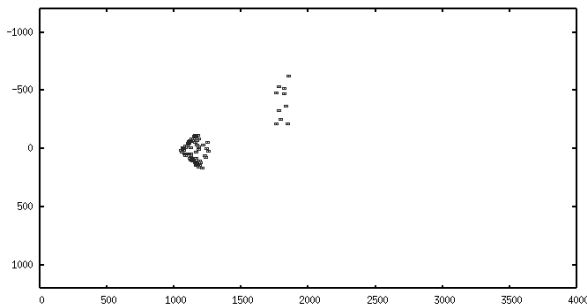


Fig.11 カメラの位置・姿勢補正後の復元結果

行き方向の距離を表し、y 軸は横方向の距離を表す。次に、Fig.7 から一つの特徴点集団を選び出した例を Fig.8 に示す。本研究では、格子のサイズは一辺 40mm とし、クラス分けの処理をおこなっている。

また、Fig.9 に、除去処理を加えない場合の 3 次元位置復元結果を示す。この例では、床面上で何もなく、本来特徴点が抽出されるはずのない位置に、誤って復元されている点があることが判る。これらの除去処理による結果は Fig.7 に示す通り、実際に存在している床面以外の特徴点で、正確な復元結果を示すものの 3 次元位置が残っていることが判る。

次に、同じ環境中で、移動ロボットのオドメトリからカメラの位置・姿勢を求めた場合の、対象物の発見処理をおこなった。この例ではカメラにある程度近い点のみを復元しているが、復元結果は Fig.10 に示すとおり、 R 、 T に誤差が入っているため、その結果が大きく歪んでしまっていることがわかる。しかし非線形最小化の処理を加えることで、最終的に Fig.11 に示す結果になる。ロボットのオドメトリからカメラの位置・姿勢を求めた場合でも、この補正処理をおこない、正確な特徴点位置を求め、その集団の一つを対象物として特定することができた。

6. まとめ

本稿では、提案するひろいあげ作業の第一段階である対象物の発見処理について、アルゴリズムと各処理の詳細を述べた。また、実験での問題点に関する対処をおこなった上で、移動ロボットによる対象物の発見処理について報告した。

これからの展望として、対象物の発見処理の高速化をおこなう必要がある。具体的には、画像取得の度に多くの時間を消費している特徴点抽出処理の改良や、非線形最小化処理に用いる特徴点について、信頼性の高いもののみを選び出す処理の追加などがあげられる。また、対象物の特定方法についても、よりロバストなグループ分け処理への変更や、対象物特定が困難な場合に、ロボットが能動的にカメラの視点を移動し対象物特定のための情報を得る手法の検討などが考えられる。そして、対象物を発見した後の段階である、形状復元処理についても検討・実装していく予定である。

参考文献

- 1) H. I. Christensen, N. O. Kirkeby, S. Kristensen, L. Knudsen, and E. Granum: "Model-driven vision for in-door navigation", *Robotics and Autonomous Systems* 12 199-207., 1994.
- 2) Eberst, C., Andersson, M., and Christensen, H. I.: "Vision-Based Door-Traversal for Autonomous Mobile Robots," *Proc. of IROS2000*, 2000.
- 3) 江口、油田: 「移動系の自由度も用いて物体を操作する小型移動マニピュレータ」, 第 6 回ロボティクスシンポジウム, pp.267-273, 2000.
- 4) 出口: 「ロボットビジョンの基礎」, コロナ社, 2000.
- 5) Kosaka, A. and Pan, J.: "Purdue Experiments in Model-Based Vision for Hallway Navigation," *Proc. of Workshop on Vision for Robots in IROS'95*, pp. 87-96, 1995.
- 6) 西川, 大西, 松本, 泉, 福永: 「カメラの位置姿勢制御を用いたモデルベース物体認識」, *IEEJ*, vol.118-c, No.2, pp.210-216, 1998.
- 7) Jianbo Shi, Carlo Tomasi: "Good Features to Track", *CVPR*, 1994.
- 8) 徐: 「写真から作る 3 次元 CG -イメージ・ベースド・モデリング&レンダリング-」, 近代科学社, 2002.
- 9) 徐, 辻: 「3 次元ビジョン」, 共立出版, 2001.
- 10) K. Nagatani, S. Yuta: "Autonomous Mobile Robot Navigation Including Door Opening Behavior-System Integration of Mobile Manipulator to Adapt Real Environment-", *International Conference on Field and Service Robotics (FSR'97)* ,pp.208-215, 1997.
- 11) T. Tsubouchi and S. Yuta: "Map Assisted Vision System of Mobile Robots for Reckoning in a Building Environment", *Proc. of ICRA'87*, pp. 1978-1984, 1987.
- 12) 友納, 油田: 「不正確さを許すマップと物体認識による屋内ナビゲーションシステム」, 第 7 回ロボティクスシンポジウム予稿集, 2002.
- 13) M. Tomono and S. Yuta: "Indoor Navigation based on an Inaccurate Map using Object Recognition", *Proc. of IROS2002*, 2002.
- 14) W. H. Press, B. P. Flannery, S. A. Teukolsky, and W. T. Vetterling. "Numerical Recipes in C: The Art of Scientific Computing", *Cambridge University Press*, 1988.